

嫌気性消化プロセスの動力学モデルとこれを用いた オペレーショナルガイド

三菱電機㈱応用機器研究所 ○廣辻 淳二

中央研究所 前田 和男

三菱電機㈱制御製作所 田中 久男 本多 敏一

1. まえがき

嫌気性消化法は、汚泥の減量、滲過性の向上および病原性微生物の減少という見地から、我国においても、下水汚泥処理、し尿処理の分野において広く用いられている。また、発生する消化ガス中に多量のメタンを含むことから、昨今のエネルギー問題とも相まって、消化ガス発電等についても検討されている¹⁾。このような消化ガスの有効利用をより効果的なものにするには、常に良好な消化状態を保ち、多量の消化ガスを発生させる必要がある。しかし、消化反応をつかさどる主要な微生物であるメタン生成微生物は、わずかな環境変化に対しても敏感であり、投入負荷、消化温度等の急変によって、消化状態の異常を来したり、過度な場合には酸敗状態に至るとさえ言われている。

消化槽を常に安定した状態に維持するためには、微生物の持つ特性、消化反応のメカニズムを正確に把握し、これに基づいて管理することが必要である。消化反応のメカニズムについては、古くから、数学モデルによる解析等、多くの検討結果が報告されている。しかし、これらは、以下に示す点において実用的でなく、実施運用に用いられている例はほとんどない。

- (1) 本来、消化反応は、酸ならびにメタン発酵過程に大別されるが、両者を一括して取扱ったものが多い²⁾。
- (2) 微生物量の指標として、DNA、酵素等を用いた例が多いが、これらの分析には長時間を要する³⁾。
- (3) 実験室規模での検討が多く、実施設での検討は少ない⁴⁾。

演者等は、これらのことを踏まえ、実用的なモデル式を考案した。さらに、これを用いた消化プロセスのオペレーショナルガイドについて検討し、良好な結果を得たので報告する。

2. 嫌気性消化プロセスの動力学モデル

本報告で提案する嫌気性消化プロセスの動力学モデルを表-1に、記号説明を表-2に示す。本モデルは、酸発酵過程とメタン発酵過程を別個に示す2相モデルであり、以下に示す特長を有している。

- (1) 酸発酵過程、メタン発酵過程における基質濃度を、それぞれ、有機物濃度、有機酸濃度で示している。
- (2) 酸発酵過程、メタン発酵過程における基質除去速度式には、1次反応式を用いている。
- (3) ガス発生については、酸発酵過程で炭酸ガスのみ、メタン発酵過程でメタンガス、炭酸ガスが発生すると示している。
- (4) 酸発酵をつかさどる微生物ならびにメタン発酵をつかさどる微生物の濃度を、それぞれ、分解除去された有機物濃度、発生したメタンガス量で示している。
- (5) 酸発酵過程で有機物分解によって生成するアンモニアと、酸発酵過程で生成、メタン発酵過程で分解ガス化する有機酸の収支によってアルカリ度を定めている。
- (6) 消化槽内pHは、消化槽内アルカリ度と炭酸の解離平衡によって定めている。

これらを換言すると、酸発酵過程では、酸生成微生物によって、投入汚泥中の有機物が分解され、有機酸、アンモニア、炭酸ガスを生成する。この時同時に、酸生成微生物は、分解された有機物量に比例して増殖する。つ

表-1 嫌気性消化プロセスの動力学モデル(完全混合槽)

$V \cdot \frac{dL_{vo}}{dt} = Q \cdot L_{vi} - Q \cdot L_{vo} - K_a \cdot S_a \cdot (L_{vo} - L_{vn}) \cdot V$	(1)
$V \cdot \frac{dS_a}{dt} = K_a \cdot S_a \cdot (L_{vo} - L_{vn}) \cdot V - Q \cdot S_a$	(2)
$V \cdot \frac{dNH_o}{dt} = Q \cdot NH_i - Q \cdot NH_o + Y_{NH/Lv} \cdot K_a \cdot S_a \cdot (L_{vo} - L_{vn}) \cdot V$	(3)
$G_{CO2o} = Y_{CO2/Lv} \cdot K_a \cdot S_a \cdot (L_{vo} - L_{vn}) \cdot V$	(4)
$V \cdot \frac{dL_{ao}}{dt} = Q \cdot L_{ai} - Q \cdot L_{ao} + Y_{La/Lv} \cdot K_a \cdot S_a \cdot (L_{vo} - L_{vn}) \cdot V - K_m \cdot S_m \cdot (L_{ao} - L_{an}) \cdot V$	(5)
$V \cdot \frac{dS_m}{dt} = Y_{CH4/La} \cdot K_m \cdot S_m \cdot (L_{ao} - L_{an}) \cdot V - Q \cdot S_m$	(6)
$G_{CH4} = Y_{CH4/La} \cdot K_m \cdot S_m \cdot (L_{ao} - L_{an}) \cdot V$	(7)
$G_{CO2m} = Y_{CO2/La} \cdot K_m \cdot S_m \cdot (L_{ao} - L_{an}) \cdot V$	(8)
$V \cdot \frac{dAlk_o}{dt} = Q \cdot Alk_i - Q \cdot Alk_o + Y_{Alk/NH} \cdot Y_{NH/Lv} \cdot K_a \cdot S_a \cdot (L_{vo} - L_{vn}) \cdot V - Y_{Alk/La} \cdot (Y_{La/Lv} \cdot K_a \cdot S_a \cdot (L_{vo} - L_{vn}) \cdot V - K_m \cdot S_m \cdot (L_{ao} - L_{an}) \cdot V)$	(9)
$pH = \log(Alk_o - 0.85 \cdot 0.83 \cdot L_{ao}) - \log(CO2)_L + \log(0.88 / K_c)$	(10)

表-2 記号一覧

記号	変数名	単位
Q	汚泥流量	m ³ /day
V	タンク容積	m ³
Lv	有機物濃度	g/g
NH	アンモニア性窒素濃度	mg/l
La	有機酸濃度	mg/l
Alk	アルカリ度	mg/l
pH	pH	—
G _{CO2o}	酸発酵過程における炭酸ガス生成速度	Nm ³ /day
G _{CO2m}	メタン発酵過程における炭酸ガス生成速度	Nm ³ /day
G _{CH4}	メタンガス生成速度	Nm ³ /day
(CO ₂) _L	消化槽内液相の炭酸ガス濃度	mg/l
Kc	炭酸解離定数	—
添字i	投入汚泥を示す	—
添字o	消化汚泥を示す	—

記号	変数名	単位
Ka	酸発酵過程における反応速度定数	g/g/day
Km	メタン発酵過程における反応速度定数	m ³ /Nm ³ /day
Sa	有機物分解量換算の酸生成微生物濃度	g/g
Sm	発生メタンガス量換算のメタン生成微生物濃度	Nm ³ /m ³
Lvn	非生物分解性の有機物濃度	g/g
Lan	非生物分解性の有機酸濃度	mg/l
Y _{CH4/La}	単位除去有機酸量当りのメタンガス発生比率	Nm ³ /mg
Y _{CO2/Lv}	単位除去有機物量当りの炭酸ガス発生比率	Nm ³ /t
Y _{CO2/La}	単位除去有機酸量当りの炭酸ガス発生比率	Nm ³ /mg
Y _{NH/Lv}	単位除去有機物量当りのアンモニア性窒素生成比率	mg/t
Y _{Alk/NH}	単位アンモニア生成量に当るアルカリ度の生成比率	mg/mg
Y _{Alk/La}	単位有機酸除去量に対するアルカリ度の生成比率	mg/mg
Y _{La/Lv}	単位除去有機物量当りの有機酸生成比率	mg/t

ぎに、メタン発酵過程では、メタン生成微生物によって、酸発酵過程で生成した有機酸が分解され、メタンガス、炭酸ガスを生成する。この時同時に、メタン生成微生物は、生成するメタンガス量に比例して増殖する。なお、メタン生成に関しては、有機酸、水素を経由して生成する2過程があるが、①有機酸を経由するものが全体の7割を占める⁵⁾②発生ガス中に水素が殆んど検知されなかったことから、有機酸経由のもので代表させた。また、このモデル式中の変数は、いずれも比較的計測が容易なものまたは処理場において通常測定しているものである。

3. 嫌気性消化プロセスの動力学モデルへの実施設データの適用

表-1に示したモデル式に、実施設のデータを適用し、動力学パラメータを定めた。すなわち、パラメータKa, Lvn, Y_{NH/Lv}, Km, Lan, Y_{Alk/NH}, Y_{Alk/La}については、消化日数一定の条件下で長期間運転し、プロセスの状態が比較的安定となった期間のデータを平滑化処理した。つぎに、これを定常状態のデータとして表-1に示したモデル式に代入し、パラメータ値を定めた。これらの結果を、図-1, 2に示す。一方、パラメータY_{CH4/La}, Y_{CO2/La}, Y_{CO2/Lv}, Y_{La/Lv}については、メタンガス濃度が変化した期間のデータを用い、表-1の微分方

式を差分化したものに代入して、各パラメータを定めた。この結果を図-3, 4に示す。図-1~4に示すように、各図のプロット点は、いずれも良好な直線性を有しており、本モデルが妥当なものであることが分る。

次に、ここで定めたパラメータ値と過去の文献値, 理論値と比較し、その妥当性について検討した。単位除去有機物量当りのアンモニア性窒素の生成比率 $Y_{NH/Lv}$ は、本報告では図-1に示したように、48.5 (g/Kg)であるが、タンパク質, 脂質, 炭水化物の各有機物組成の除去量から、タンパク質をアミノ酸の一種であるトレオニン酸として $Y_{NH/Lv}$ を求めると 53.9 (g/Kg) であり、両者は良く一致している。単位除去有機物当りの有機酸生成比率 $Y_{La/Lv}$ は、本報告では図-3に示したように、253 (g/Kg) であるが、これは、Ghosh等の報告³⁾に基づいて算出した値 98~1,380 (g/Kg) に含まれている。また、図-3, 4で定めた $Y_{CO2/Lv}$, $Y_{CH4/La}$, $Y_{CO2/La}$, $Y_{Lv/La}$ 値を用いて、酸発酵過程ならびにメタン発酵過程で発生するメタン, 炭酸ガスの全発生ガス量に対する比率を求めると、メタンガスは、酸発酵過程で 0%, メタン発酵過程で 62.7%, 炭酸ガスは、同様に、1.16%, 25.7%となる。これに対し、Ghosh等の2相消化法による実験データ³⁾では、それぞれ、1.2%, 66.7%, 4.5%, 27.7%であり、本報告で得られたデータと良く一致している。さらに、本報告で定めたアンモニア性窒素によるアルカリ度の変化量 $Y_{ALK/NH}$, 有機酸によるアルカリ度の変化量 $Y_{ALK/La}$ は、それぞれ、3.59 (g/g), 0.549 (g/g) であるがこれは、それぞれの理論値 3.57 (g/g) (=50/14), 0.833 (g/g) (=50/60) とほぼ一致している。以上のことより本報告で定めたパラメータ値は、ほぼ妥当なものと言えよう。

4. 嫌気性消化プロセスの動力学モデルを用いたオペレーショナルガイドの可能性

表-1に示したモデル式を用い、嫌気性消化プロセスのオペレーショナルガイドの主要機能の一つである消化状態予測の可能性について検討した。ここで述べるものは、ガス相で使用する消化ガス流量計, ガスクロマトグ

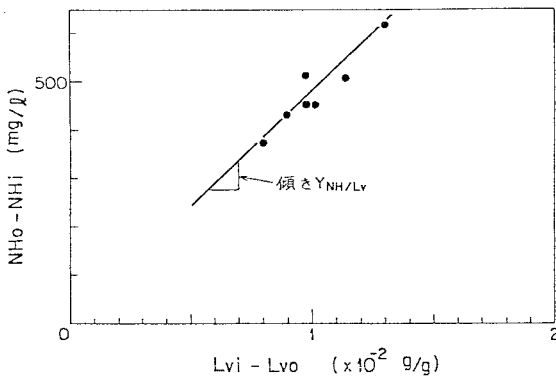


図-1 $Y_{NH/Lv}$ の決定

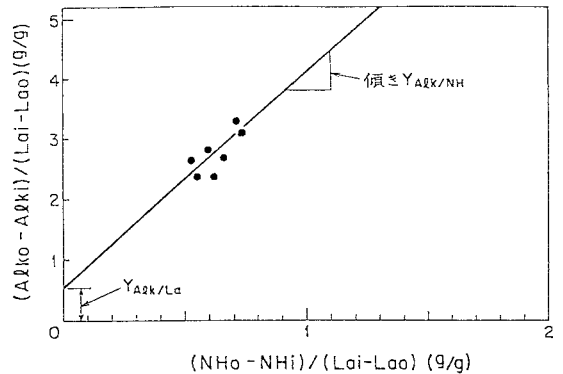


図-2 $Y_{Alk/La}$ および $Y_{Alk/NH}$ の決定

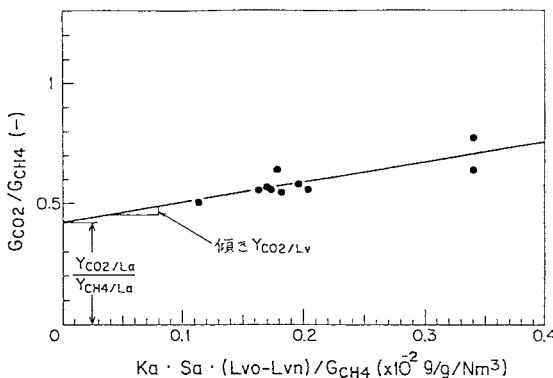


図-3 $Y_{CO2/Lv}$ および $(Y_{CO2/La} / Y_{CH4/La})$ の決定

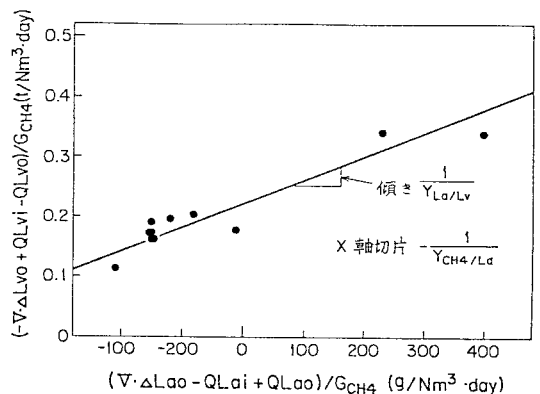


図-4 $Y_{La/Lv}$ および $Y_{CH4/La}$ の決定

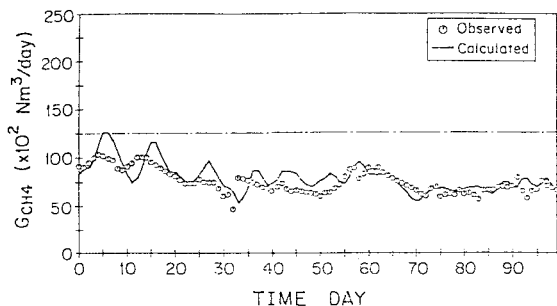


図-5 メタン生成速度の時系列

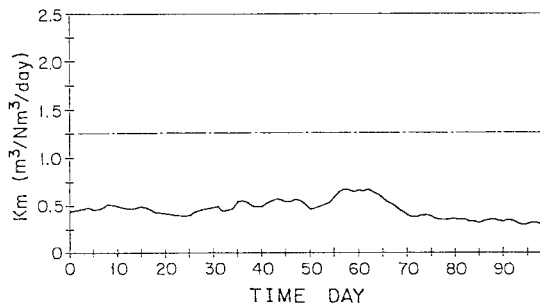


図-7 パラメータ Km の時系列

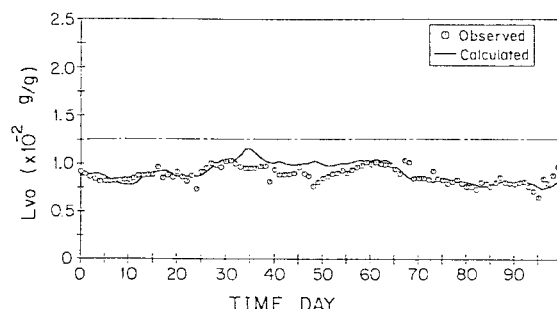


図-6 消化汚泥有機物濃度の時系列

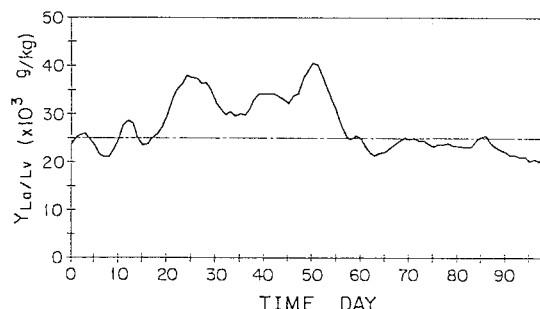


図-8 パラメータ Y_{La}/L_v の時系列

ラフが、汚泥中に浸漬して使用する汚泥濃度計等よりも保守性、信頼性の面で優れていることを考慮し、主に、消化ガスから得られる情報を用いて、反応速度定数 K_a 等を更新しながら、将来値を予測するものである。すなわち、過去数日間のメタンガス生成速度、炭酸ガス生成速度、消化汚泥有機物濃度、同有機酸濃度の実測値を用いて、 K_a , K_m , Y_{La}/L_v を逐次更新する。ここで、ガス生成速度は自動計測値、他は1日1回の手分析値を用いた。

計算機シミュレーションの結果を図-5～8に示す。図-5、6に示すように、メタン生成速度、消化汚泥有機物濃度の実測値、計算値は、数値、傾向とも比較的良く一致している。このことから、1日先の消化状態予測は、充分可能であることが分る。また、図-7、8に示すように、パラメータの推移については、 K_m は比較的安定に推移しているものの、 Y_{La}/L_v は、20日から55日にかけて一時的に増大している。この期間は、夏季の投入汚泥性状が変化した期間であり、 Y_{La}/L_v の一時的な増加は、投入汚泥性状の変化に基づくものと推察される。このことより、更新したパラメータの推移を把握することで、消化状態の変化はもちろん、投入汚泥性状の変化も知ることができると考えられる。

5. まとめ

本報告では、実用的な嫌気性消化プロセスの動力学モデルを提案し、このモデルの妥当性について述べるとともに、これを用いて将来の消化状態を予測するオペレーショナルガイドの可能性について述べた。以上示したように、モデルの妥当性は充分であり、消化状態の予測についても一日先の予測は充分可能であることが分った。

施設運転員は、このモデル式を用いて将来の消化状態、ガス発生量等を予測しながら施設運用を行なうことで、投入負荷、消化温度等の急変による消化状態の変化を未然に防ぐこと、あるいは、変化している消化状態に速に対応できると考えられる。さらには、安定した消化状態を維持しつつ、消化ガス発生量の安定化を図れば、消化ガス発電等の消化ガス有効利用もより効果的なものになるし、熱効率、処理汚泥量を考慮した運用を行えば、施設の持つ能力を充分引き出すことができ効率的な運用が可能となろう。

6. 参考文献

- (1)前田等, エネルギー資源研究会第2回研究発表会, 東京, P39 (1983)
- (2) Greaf, S. P., et al., JWPCF, 46, 666 (1974)
- (4) Massey, M. L., et al., JWPCF, 50, 2204 (1978)
- (3) Ghosh, S., et al., JWPCF, 47, 30 (1975)
- (5) Gujer, W., et al., Wat. Sci. Tech., 15, 127 (1983)